

第一篇 船机零件的损伤及其基本修复方法

第一章 船机故障与维修

§ 1-1 现代维修概念及我国修船制度

一、现代维修概念

维修作业是人类一项历史悠久的生产活动。其目标是使设备维持规定的工作能力，以确保完成预定的任务。维修的定义就是：“使产品保持在或恢复到规定设计状态所需的全部活动”。由于世界技术革命的影响，新技术、新工艺、新设备不断涌现，特别是微电子技术、通信技术的飞速发展，导致企业中所用装备发生了巨大的变化，其机械化、自动化程度急剧上升，高精度、微电脑自动监测与控制等方面的技术更加日新月异、层出不穷。因此，这对设备维修活动所涉及的人员素质、维修装备、维修策略、维修计划和维修费用等方面都提出了新的严峻的挑战。现代工业生产中的设备系统比以往任何时候更加注重其高效率、低消耗，从而使过去传统的维修模式显得难以适应，需要寻找更适合的维修制度、更有效的维修策略以及开发更先进的维修技术。

关于设备维修制度的发展历史通常划分为 3 个阶段。

第一阶段是指第二次世界大战前的一段时期。在这一时期基本上采用事后维修策略，其原因在于那时的设备多数是超强度设计，安全系数大，结构较为简单可靠，运转速度较低，工作彼此独立，某一设备因故障和修理而停机，一般不大影响其它机器工作。

第二次世界大战期间，战时对各种产品的需求量猛烈增加，且时间紧迫，工业劳动力队伍急剧下降，导致机械化程度的迅速提高，工业更多地依赖于机器，停机时间就变成了矛盾的焦点，设备维修费用也迅速增加。人们认为设备的故障应该事先预防，并且在一定程度上能够预防。于是设备预防维修制度迅速得到完善和广泛推行，这也就是我们所谈的定期维修策略。这是第二阶段，这段时期一直延续到 60 年代。

第三阶段自 60 年代，尤其是 70 年代以来，伴随着设备结构复杂化程度的上升，定期维修已不能适应新形势的要求，其原因在于许多零部件的故障是随机的，零部件越多，随机性越高。事实上，定期修理还可能将初期的高故障率引入到系统中，从而增加系统的总故障率。为了满足现代化高效率运行设备的要求，各国相继提出并形成了现代的综合维修方式，这一维修策略

强调以可靠性为中心 (RCM——Reliability Centered Maintenance) 的维修思想。该思想的宗旨是在对设备进行各种潜在故障和功能故障的后果进行分析和评价的基础上,对具有不同后果的故障制订不同的维修方针,以最低的费用实现设备固有的可靠性水平。

下面就国外几个主要国家及国内在该领域的情况做一简要介绍。

欧洲:维修工程发展迅猛。70年代初,首先在英国兴起了“设备综合工程学”(Terotechnology)这门学科,并很快得到许多国家的重视。该学科把设备的寿命周期费用最经济作为研究的目的,其内容涉及到设备、机器、装备、建筑物等规划和设计的可靠性与维修性,其安装、调试、投产、维修、改建及更新,有关设计、性能和费用等信息方面的反馈。与此同时在欧洲成立了欧洲国家维修团体联盟,它是国际上最大的维修学术团体,其学术会议每两年举行一次,每次会议都反映了欧洲维修界的新动向、新经验。其内容有:维修策略及实施、维修控制、应用现代手段和方法优化维修功能、与实现维修战略相关的管理任务、强化维修管理、突出教育培训、重视技术改造和改进性维修;维修实践等。另外在欧洲各种管理和维修模型的研究和应用也开展得比较广泛和深入。

美国:70年代前主要实现的是事后维修方式(BM——Breakdown Maintenance),其代价是昂贵的,它导致了众多的计划外停机。70年代,伴随计算机的应用,预防维修方式(PM——Preventive Maintenance)也逐渐发展起来,此阶段主要是以时间为基础的定期维修方式(TBM——Time Based Maintenance)该方式虽可能减少30%的维修费用,但不可避免地存在大量过剩维修。80年代后期,因监测技术与仪器的应用,预防监测维修方式(PDM——Preventive Diagnoses Maintenance)也发展起来,该维修方式是通过测量机械的状况,识别已有或将来的问题,预计维修的时机,减少机器的损坏和对生产的影响,其技术基础是采集和处理失效部件以不同方式发出的信息。通过推行这一维修方式所能获取的效益将体现在增加设备开工率、明显减少紧急抢修、减少机器能量消耗、提高产品质量、减少过剩维修并降低备件需求以及有效地延长设备使用寿命等方面。预测维修常用的9种预测技术是:离线振动频谱分析;在线振动频谱分析;油质及磨粒分析;红外热像分析;超声脉冲分析;声发射分析;电机工作电流分析;电机定子绝缘分析;工艺参数分析。尽管PDM可以预测维修工作,减少故障停机,但是相对于主动维修,它所能达到的程度还是有限的。主动维修(PAM——Preventive Active Maintenance)是90年代在PM与PDM的基础上发展起来的,它是通过先进的调查分析和高级的维修矫正技术,以显著延长机器寿命为目的的维修技术。而可靠性维修(RBM——Reliability Based Maintenance)则是将主动维修、预防维修和预测维修优化组合而形成的一种新的维修体制,它将可靠性工程原理直接运用于维修管理工作之中。

日本:日本战后从本国的国情出发,于60、70年代从欧美多国吸取了预防维修、生产维修和设备综合工程学等方面的经验,80年代创立了全员生产维修制(TPM——Total Production Maintenance),使不少企业的设备维修费降低1/2,故障停机减少3/4。近年来,通过从预防故障维修发展到保证设备性能和精度的质量维修,进而发展到定量地掌握设备的状态、应用设备诊断技术预知未来影响的状态监测维修(CBM——Condition Based Maintenance)几个阶段后,不少企业进入了设备综合维修管理阶段,这一体制以同生产过程直接联系的设备诊断技术为轴心,建立起包含设备诊断系统、定期诊断信息管理系统、维修管理系统和专家系统等在内的综合系统,对设备实施全面、有效的管理。

国内:我国设备维修管理从50年代起学习前苏联的计划预修制度,它对当时我国的经济建设起到了促进作用,1963年原第三机械工业部制定了《设备预修与使用管理暂行条例》,它

是建国后我国工业企业机械设备管理工作发展的一个重要标志和总结。这段时期在广大设备管理人员和群众实践的基础上，结合我国的具体情况总结出很多好的设备管理原则和方法。自1979年以来，由于引进现代设备管理的理论与方法，促进了维修制度的改进。80年代后，尤其在1983年初，国家经济委员会下达《国营工业交通设备管理暂行条例》后，企业选用多种先进体制进行综合试点，不仅有了同步修理、项目修理，而且经过10余年的发展，在预测维修方面也有了一定的基础，并大都收到了成效，令人信服。突出表现在：

1. 大修周期的普遍延长；
2. 设备维修人员对设备的技术状态心中有数；
3. 严重的恶性事故减少；
4. 设备的有效利用率提高；
5. 易于生产部门和设备维修部门的协调；
6. 大大地减少了维修费用。

船舶机械可靠性维修方面的研究近一、二十年来，在国内外都得到了更为普遍的重视。国外以日本为例，从50至60年代就开始进行船机故障及对策的研究。如：日本海上安全局、日本钢管公司，以掌握船舶动力系统整体可靠性和确立各设备可靠性对设备整体影响的评价方法为目的，开展了有关船舶动力装置故障树分析、船舶动力装置维修性及复杂性调查等研究。又如，日本造船研究会和神户商船大学及船舶技术研究所在大量的统计基础上，确定以可靠性为中心的维修思想为指导，提出船机维修新构思，建立最佳维修时机的决策方法。国外另一代表性工作是挪威于80年代建立的船舶维修保养体制（TSAR），其主要做法是将船舶自修与陆上支持相结合，构成以计算机技术为基础的科学维修保证体系。就总体来看，西方的几个发达国家如美国、英国等都在朝着将主动维修、预防维修和预测维修结合起来，成为一个统一的维修策略，即朝可靠性维修方向发展，且越来越重视应用计算机及有关技术所作出的维修决策工作。

我国自1987年颁布《全民所有制工业及交通企业设备管理条例》之后，船舶维修理论及实践也有了新的发展。突出表现之一是由交通部主持的，上海海洋运输公司和上海海运有限公司合作开发、研制的“船舶维修保养体系”（CWBT），该项目试图对船舶技术管理内容、方法和手段等方面进行改革，建立一套以机务监督为中心的机务管理机制，重点解决维修计划插板式管理和计算机管理相结合问题，为以状态为依据的维修方式的推行打下了基础。

二、我国修船制度

目前我国各用船及修船单位所推行的修船制度并不完全一致。如原中国船舶工业总公司的《舰船修理暂行条例》规定，舰船的定期计划修理分为坞修、小修、中修和大修4类。而交通部制定的有关修船规定则分为航修、小修和检修3种。

1. 航修

指船舶营运中发生局部过度磨损或一般性事故，影响航行安全而船员难以自行修复，必须由船厂或航修站修理的工程。

2. 小修

小修的目的是按规定的周期结合验船的坞内检修和年度检修，对船体和主、辅机及船舶辅助机械等设备进行不拆卸或少拆卸机器设备的必要的重点检查，包括零部件的拆检、清洗、测量、修理，以保证船舶安全营运到下次计划修理。

小修的间隔期 客货船为 12 个月 远洋货船为 12~18 个月。如船舶的技术状况良好不需修理时 经验船师检验认可后 可以延期 6 个月 但最多不超过 12 个月。

3. 检修

检修是修船的最大修理类别。检修的目的是经过 2~3 个小修以后结合验船的特别检验，拆开必要的机器设备，对船体和全船的各主要设备及系统进行一次比较全面的检查，修复已经磨损而在小修时不能解决的缺陷，保持船舶的强度并结合以后的小修统一考虑使主要设备和系统安全运转到下次检修。

§ 1-2 故 障

一、故障的基本概念

任何产品(无论整机还是零部件)凡不能完成其规定功能,或其性能指标恶化至规定标准外的一切现象,均称作故障。对不可修复产品则称作失效。

机械产品中,很多是可修复产品,当构成它的任何一个零部件损坏而不能工作时,最终均可通过更换一个新零部件或通过修复而使其工作,这就是故障。但对某一零件或总成而言,它本身可能是不可修复的。在故障中如零件损坏、磨损超限、焊缝开裂、油漆剥落、螺栓松动、标牌脱落等均属不能完成规定功能之故障 起动困难、功率下降、油耗上升、提升缓慢等超过规定值的现象 均属性能指标恶化之故障 齿轮断齿、传动胶带断裂、密封件坏、灯泡坏等均属不可修复之故障,这就是失效。

具体到机械故障来讲则是指结构、机器或机械零件在尺寸、形状或材料性质方面的改变,这些变化会使结构、机器或机械零件不能达到原有设计所要求的功能或者改变其原有的各种参数。

机械在使用过程中之所以发生故障是因为受到各种会影响到其工作能力的能量的作用,它们是机械能、热能、化学能、核能、电磁能和生物因素。这些能量或因素在机械零件中会产生一种使产品参数降低的过程,这些过程一般都与复杂的物理——化学现象紧密相连 并使零件发生变形 如磨损、断裂、腐蚀等 结果引起输出参数变化 最后导致故障发生。

二、故障的分类

故障分类的方法很多,主要决定于分类的目的与用途,以及产品结构的复杂程度。通过分类不仅可以揭示和分析故障的实质,也有利于在开展现代设备维修管理过程中选择适当的诊断方法。常见的故障分类方法有以下几种。

1. 按故障发生的基本原因分类

1) 本质故障(非相关故障)

由于零、部件本身固有的缺陷而引起的故障 称为本质故障。例如 由于结构强度、材质、加工和装配工艺等原因所引起的过度变形、断裂、过度磨损、粘结、腐蚀、老化、紧固件松动或失效“三漏”及性能恶化等。本质故障是反映产品可靠性高低的基本故障 是计算可靠性指标的主要依据。

2) 从属故障(相关故障 二次故障)

由于机械的其他零件的故障导致产生的派生故障,或外界偶然事故引起的故障称为从属

故障。例如：变速箱内某紧固件损坏，导致齿轮损坏或引起一系列其他零件损坏，则该紧固件损坏是本质故障，由此引起的其他零件损坏均属从属故障。

3) 误用故障 (人为故障)

用户不按产品使用说明书规定进行操作和使用而引起的故障，称为误用故障。这类故障往往被忽视，而实际上还是占有一定的比例。例如：轮机员未按规定要求给船舶主机加油、加水导致主机咬缸、烧瓦；用户擅自改变某一结构或调整状态，致使有关零部件损坏等。

2. 按故障的严重性及后果分类

1) 致命故障

是指危及或导致人身伤亡，引起主要总成报废或造成重大经济损失的故障。例如：飞轮破裂、机架或机体断离、车轮脱落等。

2) 严重故障

是指严重影响产品正常使用，或者规定的重要指标恶化至规定范围以外必须停机修理、修理费用较高、在较短的有效时间内无法排除的故障，即需要更换外部重要零部件或拆开机体更换内部零部件的故障。例如：发动机烧瓦、咬缸、曲轴断裂、箱体裂纹、齿轮损坏、轴承损坏等。

3) 一般故障

明显影响产品正常使用、修理费用中等、在较短的有效时间内可以排除的故障，即需要更换或修理产品外部零件的故障。例如：传动胶带断裂、灯泡损坏等。

轻度故障

轻度影响产品正常使用，暂时不会导致工作中断、修理费用低廉的故障，即在日常保养中能用随机工具轻易排除的故障。例如：非警示标牌脱落、轻微渗漏、外部一般紧固件松动、非重要塑料件出现裂纹等。

按故障的后果对机械工作能力的影响分类

完全性故障

由于故障导致机器丧失主要功能，工作完全中断。

) 局部性故障

由于故障导致机器丧失部分功能，但还能够继续使用。

按故障发生的速度及演变过程分类

突发性故障

由外界随机因素或材料内部潜在缺陷引起的突发性故障，故障的概率往往与工作时间无关，事先没有明显的征兆，往往来不及监测预报。

) 渐进性故障

机器中某些零件长期使用，这些零件的技术指标逐渐超过标准极限范围而引起的故障。这类故障占全部故障的绝大多数，可以通过监测而获得预报。

按故障发生的时期分类

早期故障

使用期故障

老化期故障

根据不同的故障分类，可以分类统计机械的故障数量，从而了解机械故障的分布特征，助于抓住关键、采用对策，并对机械的设计制造和维修使用提供有价值的信息。

三、故障的规律

在产品整个使用寿命期间 其发生故障的频度是不同的 按其故障率 $\lambda(t)$ 的变化 故障可分为早期故障期故障、偶然故障期故障和耗损故障期故障。图 1-1 所示为典型故障变化曲线，通常称为“浴盆曲线”。

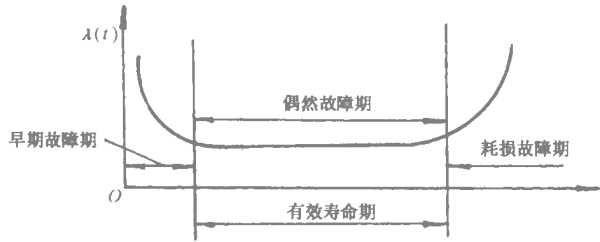


图 1-1 浴盆曲线 $\lambda-t$

早期故障期——该期间故障率急剧下降，相当于产品磨合期。其特点是：故障率较高，但随着时间的增长而迅速下降。早期故障的原因大都是由于设计不当、装配质量差、材料和结构上有某些缺陷、操作不熟练与使用环境不合适而引起的。通过试车调试、磨合、更换有缺陷的零件 故障率很快下降 并趋向稳定。

偶然故障期——该期间故障率低而稳定，基本上保持常数，与使用时间关系不大。这一时期的故障是随机发生的，即没有一定的失效机理起主导作用，大多数是由于使用不当，操作差错，润滑不良，维护不当以及材料内部缺陷，或工艺和结构缺陷等偶然因素所引起的。这一时期一般比较长 产品处于最佳工作状态 为产品的有效寿命。

耗损故障期——该期间故障率急剧上升 零件达到耗损老化阶段 维修费用急剧增长 工作效果越来越差。大多数疲劳件和易磨损零件的失效均属于这类。如在故障率急剧上升之前将老化的零件更换下来，可以降低其整机的故障率，有助于延长产品的有效寿命。

统计分析表明，并非是所有的机电产品的故障规律都符合浴盆曲线，除了有少数是耗损性失效占绝对优势的情况外，故障率变化的浴盆曲线是不适用的。如图 1-2 所示为几种典型的非浴盆化的故障率 图中 a) 没有早期故障期或早期故障期不明显，且其有效寿命的故障率为常数或略有增长 属于这种情况的产品或零部件的结构、工艺都是成熟的、系列化的、或者是经厂商认真筛选过的；b) 没有明显的早期故障期和耗损故障期，且其故障率是持续增长的，这是典型的磨损特征，应用摩擦学的最新成果是降低其故障率的最佳途径；c) 故障率是阶梯式的跳跃增长，这是由于不良维修或不良的操作引起的。不良的维修常常将高故障机制引入到稳定系统中 即通常所说的“越修越坏”。因此 对于稳定系统不应随意解体 不良的操作经常表现为违章操作和超负荷。在这种情况下，受损设备或其零部件再也不会复原了，在每一次“受损”之后 其故障率总是跳跃式的增长；d) 完全没有早期故障期和耗损故障期。其故障率呈现为常数，其故障是随机的，而且与运行时间无关，这是典型的非浴盆化曲线。这就完全打破了故障率随时间增长这一观念。产品（设备）愈复杂，机电一体化程度愈高就愈趋向这种情况；e) 没有耗损故障期，经过早期故障期之后，故障率就表现为常数，电子工业的经验早就揭示了这种规律。厂商的早期可靠性试验、筛选和健全的质量管理制度可以淘汰那些高故障率的零件和元件，然后，幸存的零件和元件就呈现出恒定的失效率，这也是一种随机故障。至于软件产品 若设计得当 总是越用越好的。因此 经过一段时间的运行 其故障率就降为零；f) 所显示的就是这种情况。

四、故障模式、故障机理及故障分布

机电产品是个复杂的系统，各个子系统、零部件的故障模式不胜枚举，其故障机理十分复

杂。所谓故障模式是指产品故障的表现形式，它是一般能观察到的故障现象，如油管漏油、电子元器件短路等。故障模式是多种多样的，在现场分析使用中，它是最基本的故障数据，利用它即可分析故障产生的原因，寻找薄弱环节，迅速采取有针对性的维修管理措施。而故障机理则是引起故障的物理、化学和材料特性等变化的内在原因、规律及其原理。它与故障模式的根本区别是：故障模式是故障的外在表现，即能观察、包括检测到的不正常现象，而故障机理则是引起这些现象的内在原因。故障机理依产品的种类、使用条件而异，不能一概而论，但往往以磨损、疲劳、腐蚀、氧化等简单形式表现。故障分布则是以数理统计及概率论为基础，从故障所占有的空间、时间角度出发对其加以分析归纳而确定的概率及统计学模型，常见的不外乎正态分布、指数分布、威布尔分布和对数正态分布等。若从故障的物理、化学、力学性质角度来归纳，也不外乎应力——强度模型、最弱环模型、退化模型和累积损伤模型等常见的物理模型。前者定量地分析故障特征，后者定性地分析故障机理。它们从不同途径描述产品的寿命分布，相互之间存在着一定的内在联系。也就是说，故障机理的特征有助于故障分布模型的判别，而故障分布模型的特性有助于故障机理的分析。具体请参见有关书籍。

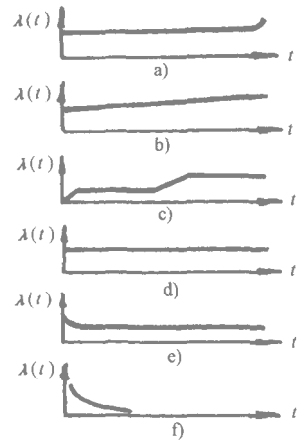


图 1-2 故障率曲线

复习思考题

1. 常见的维修方式有哪几种？各自的含义是什么？
2. 简述我国修船制度。
3. 什么叫故障？为什么要采用多种方法进行故障分类？通过查阅其他资料还可列出哪些故障分类方法。
4. 试述故障模式及故障机理的异同。

第二章 摩擦、磨损

根据统计大约有 80% 的零件都是因磨损而报废的。只要这个零件与另外一个零件之间有接触，并且有相对运动（即有摩擦）就不可避免的产生磨损，只能采取措施使其减小。摩擦磨损使船舶机械性能下降，功能丧失，甚至危及船舶的安全航行。所以，研究船舶机械的摩擦磨损，寻求减少磨损的措施，达到提高船舶使用寿命的目的，是一项非常有意义的工作。

§ 2-1 摩擦的基本理论

一、固体的表面特性

摩擦磨损都是由固体表面之间接触作用开始的，因此固体表面特性对摩擦磨损的影响很大。在未研究摩擦之前，首先有必要了解固体的表面特性。

固体的表面特性包括表面粗糙度和波纹度、表面能、化学活性、表面吸附层、氧化层或化学反应层、加工硬化层以及表面残余应力等等。

1. 表面形貌

零件表面不论用什么方法加工得到，不论表面看起来多么平整光滑，在显微镜下观察，其固体表面好似大地一样布满了峡谷、高岗和山岳。这就是说从微观的角度看任何固体表面都是不规则的，起伏不平的，即存在着粗糙度。我们通常所说的表面形貌，也就是微观粗糙度和宏观粗糙度（即波纹度）如图 2-1 所示。

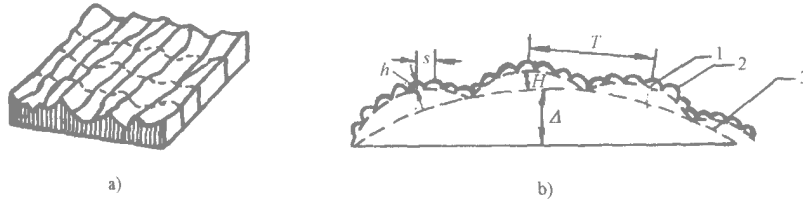


图 2-1 表面形貌的组成

a) 三维表面形貌；b) 二维表面微观几何特性

1- 波纹度；2- 粗糙度；3- 宏观几何形状偏差；T- 波纹度波距；s- 粗糙度波距；H- 波纹度波高；h- 粗糙度波高； Δ - 形状误差

表面结构中独立的单体称做微凸体。微观粗糙度指的就是这种微凸体几何形状细节；而宏观粗糙度则表示这些单体（即微凸体）的组合。不论是微观粗糙度还是宏观粗糙度，它对两个表面的接触力学性能和摩擦磨损过程与机理的影响都极大。

2. 金属的晶体结构

金属及其合金都是由原子或分子所组成的一种物质聚集态。通常金属在固态下都是晶体，即原子均为有规则的排列。如图 2-2a) 所示。

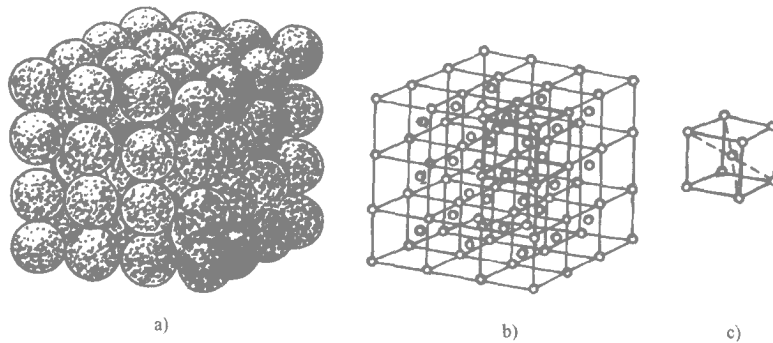


图 2-2 α -Fe 晶体中铁原子排列示意图

a) 原子堆砌模型；b) 晶格；c) 晶胞

这种具有一定几何形状的排列称为空间晶格。如图 2-2b) 所示。空间晶格的基本单元叫晶胞或单位晶格。如图 2-2c) 所示。

金属元素中约有 90% 以上的金属晶格属于下列 3 种晶格形式：

体心立方晶格 如图 2-3 所示。

面心立方晶格 如图 2-4 所示。

密排六方晶格 如图 2-5 所示。

实际金属中存在着各种各样的晶格缺陷，根据几何形态，可分为点缺陷、线缺陷和面缺陷 3 种类型。并且这些缺陷不是静止地、稳定不变地存在，而是随着条件的改变不断地变动和交

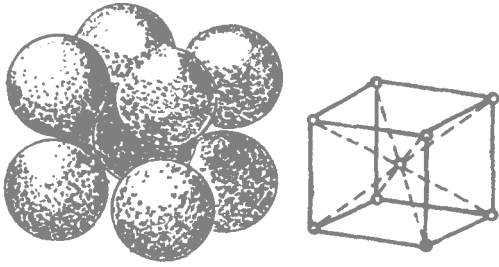


图 2-3 体心立方晶格

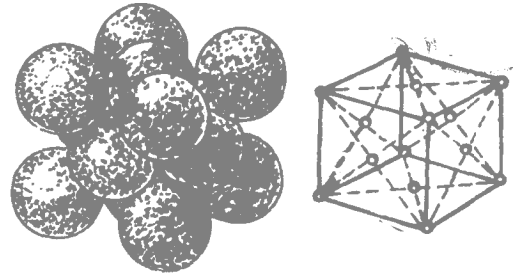


图 2-4 面心立方晶格

相互作用。这些晶格缺陷将显著地影响其机械性能和物理、化学性能，当然也会严重地影响摩擦、磨损与润滑性能。

3. 表面能

不论是液体或固体，表面原子所处的状态与内部原子所处的状态是绝然不同的。以面心立方晶格晶胞上表面为例 如图 2-6 所示。

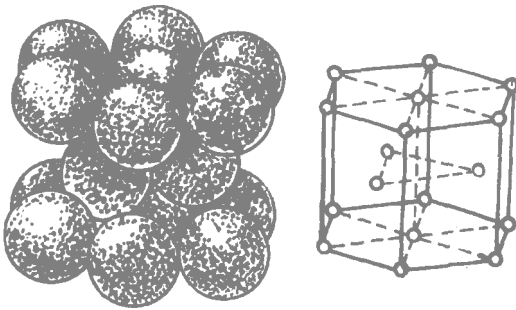


图 2-5 密排六方晶格

如原子 1 的近邻原子为 2、3、4、5。在原子 1 的下方还有 6、7、8、9 为近邻原子。因此 处在表面的 1 个原子与 8 个近邻原子相结合。而处在晶体内部的 1 个原子则与 12 个近邻原子相结合。这样一来，表面原子相对晶体内部原子就多出了 2 个完整的结合键能。它是构成表面能的主要组成部分。另外表面能还与组态熵、振动熵有关。材料种类 (晶体键合类型) 晶体取向 (原子的配位数) 温度、表面形貌和表面受污染的程度等因素都会影响表面能。

4. 表面膜

固体表面都具有一定的表面能。表面加工成型过程中产生了许多晶体缺陷，使表面的原子处于不饱和和不稳定的状态，空气中的 O_2 、 N_2 、 CO_2 等气体 润滑油中的极性基团或其它介质都会吸附在固体表面，形成各种表面膜。按结合性质不同，可分为吸附膜和反应膜两种。吸附膜又可分为物理吸附膜和化学吸附膜。反应膜又分为化学反应膜和氧化膜。

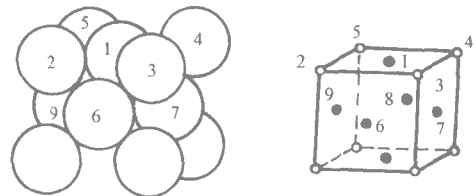


图 2-6 面心立方晶胞的原子排列

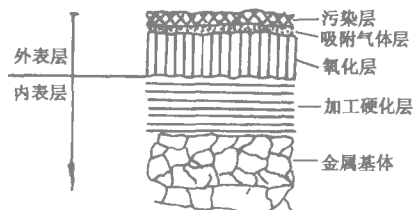


图 2-7 金属表层结构示意图

5. 金属表层的实际结构

完全洁净的金属表面在大气环境中是不存在的。一旦洁净新鲜的表面出现，就会立刻自然地吸附、污染形成覆盖膜。为了描述金属表层的实际结构，斯墨芝早在 1936 年就把它分成“外表层”和“内表层”。外表层包括 污染层 吸附层 氧化层或化学反应层 内表层即加工硬化层和塑性变形层与没有受到影响的金属基体相连，如图 2-7 所示。磨损程度和速率与摩擦负荷作用的深度有关。如果作用深度只限于外表层，则磨损小；若负荷作用达到内表层，则磨损严重。

二、固体表面的接触

摩擦磨损都是在固体表面相互接触作用下产生的，了解固体表面接触的过程、状态、性质是解决各种摩擦学问题的基础。

如图 2-8 所示，当两个金属表面相互受载接触时，开始两表面仅在少数粗糙微凸体的顶端发生接触。初始由于实际接触面积 A_r 极小，微凸体上的接触压力很大，足以使某些较高的微凸体顶部产生塑性变形（这些微凸体的下部和一些轻微接触的微凸体产生弹性变形），接触点的塑性流动将使接触面积增加。与此同时，另一些高度较低微凸体相继进入接触，接触面积不断增加直到最后实际接触面积正好支承住载荷为止 如图中 a) 所示，整个表面上接触点有塑性变形和弹性变形 如图中 b) 所示。

固体之间的接触面积可分为 3 种。

1. 名义几何接触面积 A_n 它是两接触固体几何界面的边界所确定的面积，如图 2-9 所示 $A_n = a \times b$ 。它完全由物体的几何形状确定，而与所加载荷没有任何关系。

2. 轮廓接触面积 A_p ，它是物体接触表面被压皱部分的面积。如图中虚线范围内面积的总和。 A_p 的大小与表面所承受的载荷有关。

3. 真实接触面积 A_r 在轮廓接触面内 各真接触部分微小面积之和叫真实接触面积，如图中虚线圈内黑点的各个面积之和，它只有名义面积的几分之一到几万分之一。

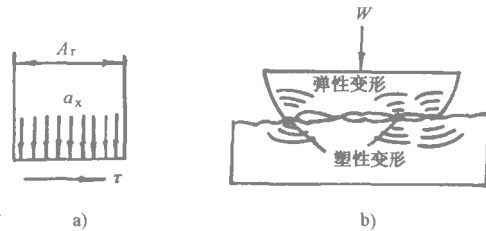


图 2-8 固体的表面接触

a) 在压应力与剪应力共同作用下的实际接触面积；

b) 接触点的塑性变形及粘着点的形成

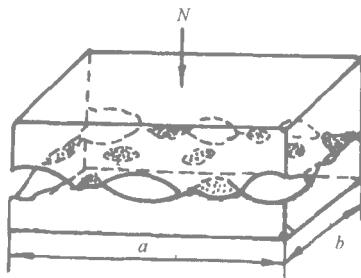


图 2-9 粗糙接触表面面积

两个承载接触的固体表面 接触是发生在微凸体上 并且是连续的 离散的。真实接触面积与载荷成正比 与表观面积(名义面积)无关。载荷增加 真实接触面积增加是靠接触点数量增多而增加，而不是靠接触点尺寸增大而增加，因为每个接触点的平均尺寸几乎保持不变，即载荷与微凸体接触的数目成正比。承载微凸体平均压力为一个恒定值，与载荷大小无关。

三、摩擦理论

两个物体相互接触 在外力的作用下 发生相对运动或有运动的趋势 接触表面之间就会产生一种阻碍运动的力 即摩擦力 这种现象称为摩擦现象。

按摩擦副的运动状态分为静摩擦和动摩擦。按摩擦副的运动形式分为滚动摩擦和滑动摩擦。按摩擦副表面润滑状态分为干摩擦、边界摩擦、流体动力摩擦。

在干摩擦条件下根据前人试验的结果，归纳出的古典摩擦定律如下：

1. 摩擦力的大小与作用于摩擦面的法向载荷成正比。
2. 摩擦力的大小与表观面积（名义面积）无关。
3. 静摩擦力大于动摩擦力。
4. 摩擦力与滑动速度无关。

目前 上述定律对于一般工程问题 金属材料、弹——塑性材料仍是适用的 可作为公理和

法则来使用。但是对于粘——弹性材料、复合材料、很硬的材料或很软的材料是不适用的，使用时要特别注意。

§ 2-2 磨损原理及减少磨损的途径

一、概述

物体表面相对运动时，由于机械和化学的作用过程，引起摩擦表面物质逐渐损耗或产生残余变形，称为磨损。

根据磨损破坏的机理和特征，磨损可分为 5 类，即粘着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损。

耐磨性是材料抵抗磨损的一个性能指标，可用磨损率的倒数来表示。磨损量有下列表示方法：

1. 线磨损

它是用摩擦表面法向尺寸减少量来计量的，用 Δh 表示。也可用线磨损率 K_L 来表示，即滑动单位路程 L 摩擦表面法向尺寸的减少量。

$$K_L = \frac{\Delta h}{L}$$

2. 体积磨损

它是用单位面积上物质体积的减少量来计量的，用 ΔV 表示。也可用体积磨损率 K_V 来表示，即单位面积 A_n 内滑动单位路程表面物质体积的减少量。

$$K_V = \frac{\Delta V}{A_n L}$$

3. 重量磨损

它是用单位面积内表面物质重量的损失来计量的，用 ΔW 表示。也可用重量磨损率 K_W 来表示，即单位面积内滑动单位路程表面物质重量的损失量。

$$K_W = \frac{\Delta W}{A_n L}$$

4. 比磨损率

单位载荷 P 作用下，滑动单位路程所磨去的体积或重量。

$$W_V = \frac{\Delta V}{PL} \text{ 或 } W_W = \frac{\Delta W}{PL}$$

二、粘着磨损

摩擦副相对运动时，由于固相焊合，接触表面的材料从一个表面转移到另一个表面而发生破坏的现象，叫做粘着磨损。

粘着磨损常发生在刀具、模具和热机中，它是汽车、拖拉机、轻工机械、海运和铁道机械中主要的磨损形式之一。航空发动机中有 30% 的零件受到粘着磨损。

影响粘着磨损的主要因素有材料、载荷、滑动速度、温度及润滑剂等。

1. 抗粘着磨损材料的选择

1) 脆性材料比塑性材料抗粘着能力高。塑性材料磨痕深，磨粒粗大，破坏严重；脆性材料

磨痕浅 磨粒细小 破坏轻微。

2) 互溶性的材料配磨粘着倾向大；非互溶性的材料配磨粘着倾向小。同名金属配磨粘着倾向大；异名金属配磨粘着倾向小。最好选用金属与非金属配磨。

3) 金相结构上 多相 合金化合物比单相 纯金属粘着倾向小。

4) 元素周期表中 B 族元素与铁不相溶，粘着倾向小。而 A 族元素与铁配磨，粘着倾向大。

2. 载荷的影响

随法向载荷增加，磨损率开始保持不变，当载荷超过材料硬度的 $1/3$ 时 即达到屈服极限以后 磨损急剧增加。

3. 滑动速度的影响

在一定压力时，粘着磨损随滑动速度的增加而增加，在达到某一极大值后，又随滑动速度的增加而减少。如图 2-10 所示。

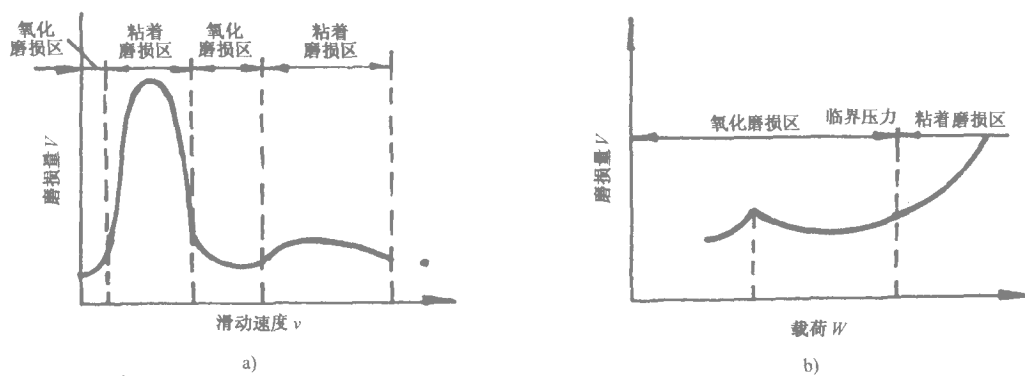


图 2-10 磨损量与滑动速度和载荷的关系

a) 滑动速度 V ; b) 载荷 W

4 温度的影响

摩擦表面的温度升高，使材料的硬度下降，粘着倾向增大，表面生成化合物薄膜。温度变化影响氧化速度和氧化物的种类，使润滑油的粘度下降，当超过一定的极限时，甚至引起油的变质和失效。特别是热点温度，即局部接触点上瞬间的温度。在整个表面温度（平均温度）不太高时 热点温度高 在低速摩擦范围内对磨损有直接影响。

三、磨粒磨损

由硬颗粒或硬凸起引起材料的破坏，分离出磨屑，形成划伤或压痕的磨损叫磨粒磨损。这是磨损类型中最多的一类，占机械零件磨损中的 50%。它常常发生在农业机械、矿山机械、建筑机械、港口机械和交通运输机械中。

影响磨粒磨损的主要因素有材料的硬度、显微组织、加工硬化、材料的断裂韧性、弹性模量、磨粒硬度和粒度等因素。

1. 材料硬度的影响

对纯金属、未经热处理的金属，其抗磨粒磨损的能力与它们的自然硬度成正比。经热处理的钢 硬度提高很多 但耐磨性提高较少。

2. 显微组织的影响

钢中碳化物形成元素含量越高 则耐磨性也越大。基体组织按铁素体、珠光体、贝氏体、马

氏体、贝氏体加马氏体的顺序其耐磨性逐渐提高。片状珠光体的耐磨性大于粒状珠光体，板条状马氏体的耐磨性大于片状马氏体。因此，国内外相当数量受冲击载荷的零件都处理成贝氏体组织。钢中碳化物是重要的第二相，合金碳化物的耐磨性大于普通碳化物。在软的基体中加入碳化物能提高耐磨性，在硬的基体中加入碳化物会降低耐磨性。因此，在软的基体（如铁素体、珠光体）中加适量细小的、粒状均匀分布的碳化物，耐磨性就好。铸铁材料含碳化物多，凡允许使用铸铁的场合应尽可能使用铸铁。例如 镍硬铸铁、高铬铸铁、锰铸铁等。

3. 加工硬化的影响

加工硬化对于低应力擦伤式磨粒磨损的耐磨性不会提高，甚至有降低的趋势。但在高应力冲击式的磨粒磨损中，加工硬化后的硬度愈高，其磨损抗力也愈高。奥氏体高锰钢做碎石机的球锤可呈现很好的耐磨性，做拖拉机履带时耐磨性不太好。

4. 断裂韧性的影响

断裂韧性和硬度是两个相互矛盾的指标。材料的硬度提高，断裂韧性值必然就低，耐磨性差；断裂韧性很高，硬度就必然低，耐磨性也差。只有硬度和断裂韧性两者兼顾的材料才会有高的耐磨性。

5. 磨粒硬度与材料硬度之比的影响

磨粒硬度 H_a 与材料硬度 H_m 之比对磨损影响很大 如图 2-11 所示 可分为 3 种不同的磨损状态。在第 I 区中 磨损很小 $H_a/H_m < 0.7$ 称为低磨区。当 $H_a/H_m > 1.3$ 时 称为高磨区 (III 区) 磨损机理为微切削 磨损量维持一个定值 不随 H_a/H_m 比值增大再增大。当 $0.7 < H_a/H_m < 1.3$ 时 称为过渡区 (II 区) 磨损量随着 H_a/H_m 比值的增大而增大。

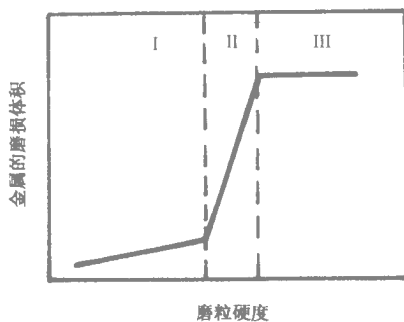


图 2-11 磨粒硬度对金属磨损的影响

除了上述因素之外，材料的弹性模量、磨粒的形状、尺寸、数量、湿度和速度等因素都对磨粒磨损有影响。

四、表面疲劳磨损

两个接触表面作滚动或滚滑复合摩擦时，在交变接触压应力作用下，使材料表面疲劳而产生物质损失的现象叫做表面疲劳磨损。

它常发生在滚动轴承、齿轮、凸轮、钢轨与轮箍等摩擦副中，破坏生成麻点、针状或痘斑状的凹坑，或产生较大面积的压碎或剥落。

影响表面疲劳磨损的主要因素有冶金质量、热处理组织、表面状态、表面粗糙度和润滑油的粘度等。

钢在冶炼时总存在非金属的夹杂物 特别是一些脆性的（如氧化铝、硅酸盐、硅钙酸盐和铁锰酸盐等）夹杂物，破坏了基体的连续性，在受载时与基体的变形不协调，很容易在边界处棱角处引起应力集中，造成微裂纹，降低了疲劳磨损的寿命。但在钢中有适量的硫化物，往往能将上述脆性夹杂物包容起来，在受载变形时能起到协调变形、缓解应力集中的作用，因此适量的硫化物会提高疲劳磨损的寿命。

承受接触应力的机件，多采用高碳钢淬火、表面渗碳强化。马氏体的含碳量控制在 0.4%~0.5% 左右时，接触疲劳寿命最高。钢中未溶碳化物的含量应控制在 6.5% 以内 否则会造成晶粒粗大。马氏体含碳不均，会降低疲劳磨损寿命。马氏体的级别应尽量为细小的针状，未溶碳化物应使其细小、均匀、粒状、避免带状。

表面状态即表面硬度应保持在 HRC58~60 范围内, 此时有最佳的疲劳磨损寿命。心部硬度应保持在 HRC35~40 的范围内, 与表层硬度匹配。经表面强化处理的机件, 硬化层深度应有一定的要求。大小齿轮啮合时, 小齿轮与大齿轮的硬度比保持在 1.4~1.7 可提高承载能力 30%~50%。表面残余应力在硬化层深度的 60% 处应处理成残余压应力。

表面粗糙度越小, 疲劳磨损寿命越高。

油的粘度越高, 疲劳磨损寿命越高, 特别是油中含有水, 会大大地降低疲劳磨损寿命。

五、腐蚀磨损

摩擦时材料与周围介质发生化学或电化学反应的磨损, 叫做腐蚀磨损。

腐蚀磨损常常发生在化工机械、造纸机械、印染机械和制氧机械中。

由于介质的性质、作用不同 腐蚀磨损出现的状态也不同 常见的有氧化磨损 特殊介质的腐蚀磨损和穴蚀。

氧化磨损是一种最常见的磨损形式。除了金、铂等少数金属以外, 大多数金属的表面都生成氧化膜, 起到保护金属、降低磨损率的作用。其破坏的特征为沿摩擦面滑动方向呈均匀细小的磨痕。影响氧化磨损的因素有滑动速度、接触载荷、氧化膜的硬度、介质的含氧量、润滑条件和材料等。

当摩擦副与酸、碱、盐等特殊介质发生化学腐蚀作用而造成的磨损称为特殊介质的腐蚀磨损。金属与特殊介质形成的腐蚀物极易从表面擦去, 露出新鲜的金属又被腐蚀、擦去, 就这样不断地循环往复下去, 因此磨损的速度很快。解决这个问题的办法就是选用抗腐蚀的材料, 镍、铬、钛等金属在特殊介质的作用下 表面能生成结合力高、结构致密的钝化膜 保护金属、减轻磨损 钨、钼是抗高温腐蚀磨损的重要材料 在 500°C 以上生成的保护膜稳定、抗磨损性能强。轴承合金中的铅、锡等元素 易被润滑油中的有机酸腐蚀 使轴承表面生成黑点 逐渐扩展成海绵状空洞, 因此常常在轴承表面镀一层薄的钢、钒作为保护层。

固体相对气蚀状态的液体运动而产生的表面破坏称为穴蚀。当零件与高速流动的液体接触时 液体中局部压力比蒸气压力低 液体将形成气泡 这些气泡遇高压时被压缩到溃灭状态, 则瞬间产生极大的冲击力及高温, 作用在零件表面局部点上。气泡的形成和溃灭的反复作用, 使零件表面材料疲劳而逐渐脱落 生成麻点状凹坑 扩展呈泡沫海绵状 严重时扩展深度很快, 最大可达几十毫米。穴蚀是一种比较复杂的破坏现象, 它往往不仅是机械作用造成破坏, 液体的化学及电化学反应, 液体中含有磨料等都将加剧这一破坏过程。

六、微动磨损

两接触表面由于受相对低振幅振荡运动而产生的磨损称为微动磨损。通常发生在紧配的销轴、静配合的螺栓、花键等接合面上。

微动磨损的过程是由于接触压应力使摩擦副表面的凸起部分发生塑性变形和粘着。小幅振动使粘着点剪切脱落, 露出基体金属表面, 这些脱落颗粒及新表面又与大气中的氧反应, 生成以 Fe_2O_3 为主的氧化物, 磨屑呈红褐色, 如有油时则流出红褐色胶体。这些磨屑不易从表面排出, 在摩擦表面上起磨料的作用加速磨损。一般来说, 抗粘着磨损性能好的材料也具有良好的抗微动磨损性能。提高硬度可以降低微动磨损, 适当润滑可有效地改善抗微动磨损能力。随着载荷增加 微动磨损加剧 当载荷达到某一值以后 微动磨损又随载荷的增加而减小。

七、船舶机械中常见的磨损类型及减少磨损的途径

上面分别按照粘着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损和微动磨损 5 大类型进行了介绍，但是具体到一个实际的摩擦副中，可能有 2 种或 2 种以上的磨损类型存在，并且它们是相互影响相互作用的。下面的例子就可说明。

船舶主辅机的缸套与活塞环这对摩擦副中，就经常发生粘着磨损、磨粒磨损和腐蚀磨损。特别是缸套的上止点附近，由于高温、高压，使缸套与活塞环处于干摩擦或边界摩擦状态下，极易发生粘着磨损。严重时产生拉缸，即沿运动方向在缸套与活塞环表面产生不规则沟状条纹。经过良好磨合及有效润滑，缸套与活塞环进入稳定磨损阶段，即氧化磨损时，磨损率很小。稍有变化或润滑不良，就很容易从氧化磨损转化到粘着磨损。

新鲜空气进入缸套时将灰尘或外界硬物带入，或是润滑油中的杂质，磨下的金属磨屑，这些磨料就造成缸套与活塞环的磨粒磨损。

由于燃油中含有硫分，燃烧后生成酸性氧化物 SO_2 、 SO_3 和燃气中的水蒸气，在较低温度时生成硫酸，造成缸套的腐蚀磨损。

减少缸套与活塞环磨损可分 2 个阶段。第一阶段要正确地选择磨合参数，一般的原则是由低速到高速，逐级加载，加载如果过快，有可能造成拉缸事故。经过磨合后建立起来的粗糙度直接决定了这对摩擦副的使用寿命。第二阶段，即正常运转期间应从以下几个方面进行：

1. 加强燃油和燃烧的管理

燃油质量对缸套磨损影响很大。燃油中含硫量大，引起缸套的腐蚀磨损，油中的灰分和杂质引起磨粒磨损。因此针对杂质多、灰分大、含硫高、粘度大的燃油，应进行分离、净化、加温等措施。

2. 保证良好的缸套润滑条件

根据机器的工况、燃油成分，选用适合的润滑油。含硫高的燃油，应选用碱性添加剂的气缸油。平时管理中，应注意滑油的净化、过滤，使用一段时间后，应更换或补充新油。

3. 注意冷却水的温度控制

不能使冷却水的温度过高或过低，过低时发生硫酸腐蚀，过高时则油膜容易破坏，加剧磨损。

4. 缸套与活塞、活塞环之间的间隙应保持恰当，活塞运动时的对中性应良好，否则易引起拉缸。

曲轴与轴承的磨损。曲轴颈与轴承受燃气的压力，活塞、连杆运动件的惯性力，这两种力都是成周期性变化的。因此，油膜厚度在轴承内不能保持恒定，在最小油膜厚度时局部压力值很高，为轴承平均压力的 6~10 倍，这样的过载，使油膜破坏，轴与轴承发生粘着磨损，甚至有烧坏轴承的危险。因受周期变化载荷的反复作用，轴承往往发生疲劳，产生龟裂，特别是薄壁轴承，这是常见的故障之一。

单边磨损、擦伤、疲劳剥落和熔化等均属于非正常磨损。粘着磨损会产生轴瓦的擦伤、撕裂以致熔化和咬死；磨粒磨损是由于硬质颗粒在轴瓦上拉出划痕或沟槽，以致大面积的擦伤；过载、过热和异物嵌入合金层会使轴瓦合金层疲劳强度降低产生裂纹，进而产生合金层片状剥落，滑油变质，穴蚀和船上的散杂电流会使轴瓦被腐蚀，而且腐蚀产物将成为磨粒引起磨损。

非正常磨损还会与轴、轴承的加工制造和装配质量有关，此外还受机座变形，轴承刚度不足的影响。据统计，在轴承故障的原因中，污物引起的占 44.9%，安装不良造成的占 13.4%，对

中性差导致的占 12.7% 润滑不良酿成的占 10.8% 过载造成的占 9.5%。从中可以看出 因维护管理不良造成的故障占 65.2%。因此在减少曲轴与轴承的磨损措施中 以加强轴与轴承的维护管理最为主要。

除了上述的两对摩擦副之外，船机设备中存在着各种各样的磨损问题。螺旋桨轴与尾轴承的磨损 主要是磨粒磨损 油润滑的尾轴承也常发生烧瓦 同时还有腐蚀磨损。

船上甲板机械中的传动齿轮，存在磨粒磨损、腐蚀磨损和表面疲劳磨损。

各种水泵的轴承存在着磨粒磨损。叶轮、螺旋桨、高压油泵的柱塞等都有穴蚀的问题。因此 掌握摩擦磨损的基本知识 解决船舶中各种磨损问题 对提高船舶维修水平至关重要。

复习思考题

- 1 固体表面有哪些特性？它们对摩擦磨损有什么影响？
- 2 什么是表面能？影响表面能的主要因素有哪些？
3. 金属表层的实际结构是由哪几层组成的？
4. 抗粘着磨损配对摩擦副，选材时应注意些什么问题？
5. 什么是磨粒磨损？影响磨粒磨损的主要因素有哪些？
6. 什么是表面疲劳磨损？它常发生在哪些摩擦副中？
7. 什么是腐蚀磨损？它常发生在哪些机械中？
8. 什么是微动磨损？它常发生在哪些地方？发生时有些什么典型的特征？
9. 船舶机械中有哪些主要的磨损类型？举例说明。

第三章 无损探伤

无损探伤是借助于物质的各种效应 (如电磁、压电等) 不损伤零件而检查出零件表面或内部的缺陷 (如裂纹、夹渣和气孔等) 的位置、大小和性质等的方法。无损探伤的方法较多 而且在生产实践中均获得广泛应用。现仅就船机修造中常用的几种无损探伤方法分别介绍如下。

§ 3-1 磁粉探伤

一、磁粉探伤的原理和特点

1 磁粉探伤的原理

磁粉探伤又称磁力探伤。因为铁磁性材料 (如铁、碳素钢和某些合金钢) 的导磁率比其它材料的导磁率大 如果铁磁材料的零件存在有裂纹、气孔和夹渣等缺陷 当零件被磁化后 由于缺陷处的导磁率小即磁阻大，会使磁力线产生弯曲和密集现象。当缺陷在零件表面或近表面时，则磁力线不但会在零件中产生弯曲，而且一部分磁力线还会绕过缺陷暴露在空气中，产生漏磁现象。这种漏磁就在零件表面上形成一对 N、S 极的局部磁场 (如图 3-1a) 所示。如果撒上磁铁粉或浇上磁悬液，局部磁场便吸附磁铁粉而显示出缺陷的形状、大小和位置。如图 3-1b)

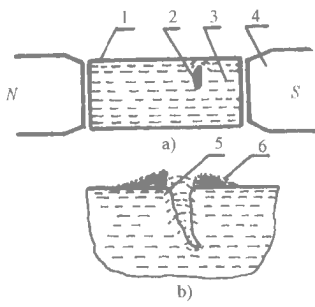


图 3-1 磁粉探伤原理图
1.零件;2.缺陷;3.磁力线;
4.电磁铁;5.漏磁;6.磁铁粉

所示为零件缺陷部分漏磁的局部放大图。

2. 磁粉探伤的特点

由上述探伤原理可知，磁粉探伤只适用于铁磁性金属零件表面或近表面的缺陷检查。因为零件内部的缺陷虽然也会使磁力线密集，但对表面影响太小，无法吸附表面的磁铁粉。磁粉探伤只能检查出与磁力线垂直或成一定角度的缺陷，如果缺陷细小且与磁力线平行或所成的夹角太小，磁力线密集或漏磁现象较弱，也很难吸附表面的磁铁粉而显示缺陷。因此要准确地检查出零件的缺陷，必须正确地选择磁化电流的大小和磁化方法。

二、各种磁化方法

磁粉探伤时 零件磁化方法有以下 3 种 纵向磁化、周向磁化和综合磁化。

1. 纵向磁化

纵向磁化是指零件磁化后，所产生的磁力线方向与零件纵长方向或轴线方向一致的磁化方法。它适用于检查零件圆周方向和垂直于轴线或与轴线成一定角度的缺陷。纵向磁化时，可使用交流电或直流电，通过铁轭或线圈方式来实现，如图 3-2 所示 图中 a)为铁轭磁化法，此法适用于中型零件的探伤，铁轭是用导磁良好的材料所制成 图中 b)为线圈开端磁化法 此法适用于较长的轴类零件的探伤，其优点是设备简单，只要在被检查零件上绕以数圈导线就可以达到磁化目的；图中 c)为线圈闭端磁化法，此法除在被检查零件表面上绕以线圈外，还将铁轭与零件两端相接触，铁轭的作用是加强电磁感应和改善零件两端磁化情况 以提高灵敏度。

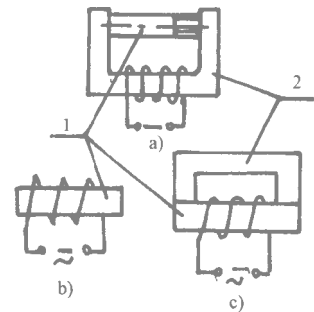


图 3-2 纵向磁化示意图
1.零件;2.铁轭

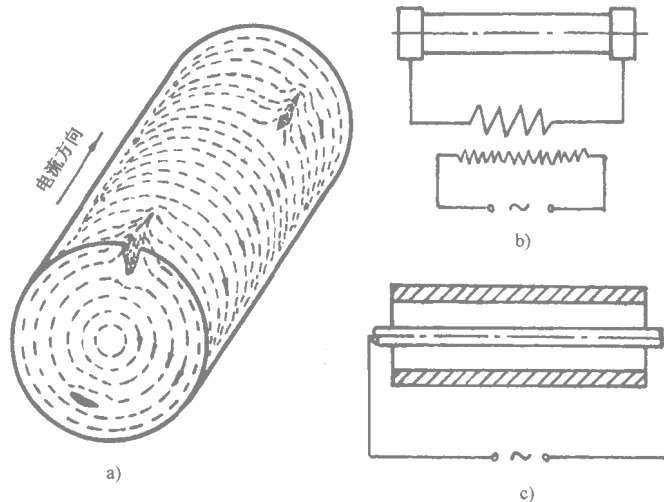


图 3-3 周向磁化示意图

2. 周向磁化